

XINSHIJI DIANGONG DIANZI SHIYAN XILIE GUIHUA JIAOCAI

新世纪电工电子实验系列规划教材

DIANGONG DIANZI SHIYAN YINGYONG JIAOCHENG

电工电子实验应用教程

(第2版)

主 编◎郭建江

.....



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

新世纪电工电子实验系列规划教材

电工电子实验应用教程

(第2版)

主 编 郭建江
副主编 许 玲 范力旻
刘 敏 俞 霖

东南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电工电子实验应用教程/郭建江主编. —2版. —南京:东南大学出版社,2015.2

新世纪电工电子实验系列规划教材

ISBN 978-7-5641-5549-0

I. ①电… II. ①郭… III. ①电工技术—实验—高等学校—教材②电子技术—实验—高等学校—教材 IV. ①TM-33②TN-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 039754 号

电工电子实验应用教程(第2版)

出版发行 东南大学出版社

出版人 江建中

社址 南京市四牌楼2号

邮编 210096

经销 江苏省新华书店

印刷 江苏凤凰盐城印刷有限公司

开本 787 mm×1092 mm 1/16

印张 17.75

字数 443千字

印次 2015年2月第1次印刷

版次 2010年9月第1版 2015年2月第2版

印数 1—3000册

书号 ISBN 978-7-5641-5549-0

定价 38.00元

(本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话:025-83791830)

第2版前言

本书是根据应用型本科类专业电工电子实践教学体系改革与实践的教学要求而编写的,主要培养学生基本的电工电子测量和科学实验的能力,同时加深学生对理论教学内容的理解。

本书主要针对应用型本科电类和非电类专业的工科学生,培养学生基本的电工电子电路的测试能力和科学实验能力,通过实验提高学生的工程实践能力和科研开发能力。

本书将电类专业的电路和电子技术实验以及非电类专业的电工电子实验、电子测量技术融为一体,面向多种专业应用,适用于不同的专业需求,使专业性与实验技术紧密结合起来。采用理论与实验相结合的形式,培养学生使用仪器、测试电工电子电路以及处理测试数据等的的能力,同时注重对学生实验设计和实验方法的培养。采用该书进行教学可独立于理论教学,也可与理论教学并行。

本书分为4章。第1章至第3章为电工电子测量技术,包括测量误差理论、测量仪器的原理和使用、元器件和电路测量方法。第4章为电工电子技术实验方法,包括电工技术、模拟电子技术、数字电子技术等实验方法。附录给出了电工电子实验装置等资料,供读者参考。

本书第1—3章由郭建江编写,第4章由许玲、范力旻、刘敏、俞霖编写,附录由郭建江、俞霖编写。全书由郭建江组织编写和统稿,担任主编;许玲、范力旻、俞霖担任副主编。

本书的编写工作得到了常州工学院教学改革基金的支持,同时也得到了常州工学院教务处领导及兄弟院校老师的支持,在此一并表示衷心地感谢。

第2版在第1版基础上作了部分修改,由于作者编写水平有限,编写修改时间比较仓促,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2015年2月

目 录

1	电工电子测量误差理论	(1)
1.1	测量误差基本概念和分类	(1)
1.1.1	误差的基本概念	(1)
1.1.2	测量误差的表示法和分类	(2)
1.2	测量误差的估计和常用消除方法	(7)
1.2.1	随机误差的估计和消除方法	(7)
1.2.2	系统误差的估计和消除方法	(10)
1.2.3	疏忽误差的估计和消除方法	(13)
1.3	测量数据的处理	(15)
1.3.1	有效数字及其运算	(15)
1.3.2	有效数字的舍入原则	(17)
1.3.3	等精度测量数据的处理	(17)
1.4	测量方案设计	(20)
1.4.1	测量方案设计原则	(20)
1.4.2	测量阶段和过程	(21)
1.5	思考题	(22)
2	电工电子测量仪器	(23)
2.1	示波器	(23)
2.1.1	功能和组成	(23)
2.1.2	模拟示波器	(24)
2.1.3	VP-5220D/C 型双踪示波器	(31)
2.1.4	数字存储示波器	(38)
2.1.5	TDS 210 型数字存储示波器	(43)
2.2	信号发生器	(50)
2.2.1	基本原理和组成	(50)
2.2.2	几种典型的信号发生器	(53)
2.3	直流稳压电源	(56)
2.3.1	基本原理、组成和应用	(56)
2.3.2	主要技术指标及其测量方法	(58)
2.3.3	几种典型的稳压电源	(60)
2.4	常用电参数测量仪器	(63)
2.4.1	万用表	(63)
2.4.2	电子电压表	(69)
2.4.3	功率表	(70)
2.4.4	频率计	(73)

2.5	现代测试仪器——虚拟仪器	(75)
2.5.1	虚拟仪器的产生和发展	(75)
2.5.2	虚拟仪器的特点	(77)
2.5.3	虚拟仪器的组成、功能和原理	(78)
2.5.4	虚拟仪器的软件	(80)
2.6	思考题	(81)
3	电工电子测量方法	(83)
3.1	常用元器件型号和识别	(83)
3.1.1	电阻元件	(83)
3.1.2	电容元件	(86)
3.1.3	电感元件	(88)
3.1.4	半导体器件	(88)
3.1.5	表面组装元件	(95)
3.2	基本电参数的测量	(96)
3.2.1	电压的测量	(96)
3.2.2	电流的测量	(97)
3.2.3	频率的测量	(97)
3.2.4	相位差的测量	(98)
3.3	集中参数的测量	(100)
3.3.1	电阻的测量	(100)
3.3.2	电容的测量	(101)
3.3.3	电感的测量	(103)
3.4	电路仿真测量	(104)
3.4.1	Multisim 2001 仿真工具的构成	(104)
3.4.2	Multisim 2001 仿真工具的应用	(125)
3.5	思考题	(136)
4	电工电子技术实验方法	(137)
4.1	概述	(137)
4.2	电路与电工技术实验	(138)
4.2.1	实验 1:基尔霍夫定律	(138)
4.2.2	实验 2:叠加原理	(140)
4.2.3	实验 3:戴维南定理和诺顿定理	(141)
4.2.4	实验 4:受控源特性测试	(143)
4.2.5	实验 5:双口网络测试	(146)
4.2.6	实验 6:交流电路参数的测量	(150)
4.2.7	实验 7:日光灯功率因数的提高	(154)
4.2.8	实验 8:互感电路	(156)
4.2.9	实验 9:变压器参数测量	(161)
4.2.10	实验 10:电路频率特性的研究	(163)
4.2.11	实验 11:三相交流电路电压和电流测量	(166)
4.2.12	实验 12:三相交流电路功率测量	(169)
4.3	模拟电子技术实验	(172)
4.3.1	实验 1:常用电子仪器的使用	(172)

4.3.2	实验 2:单管交流放大电路	(175)
4.3.3	实验 3:两级阻容耦合放大电路	(178)
4.3.4	实验 4:反馈放大电路	(182)
4.3.5	实验 5:射极跟随器	(184)
4.3.6	实验 6:RC 正弦波振荡电路	(187)
4.3.7	实验 7:直流差动放大电路	(189)
4.3.8	实验 8:场效应管放大电路	(192)
4.3.9	实验 9:LC 正弦波振荡器	(195)
4.3.10	实验 10:OTL 功率放大器	(197)
4.3.11	实验 11:集成功率放大器	(199)
4.3.12	实验 12:集成运算放大器的线性应用	(201)
4.3.13	实验 13:集成运算放大器的非线性应用	(203)
4.3.14	实验 14:集成运算放大器的反馈电路	(205)
4.3.15	实验 15:串联稳压电路	(207)
4.3.16	实验 16:集成稳压电源	(210)
4.3.17	实验 17:可调集成稳压电源	(212)
4.3.18	实验 18:综合性实验——温度测量和控制电路	(215)
4.3.19	实验 19:设计性实验——函数信号发生器的设计和调试	(219)
4.4	数字电子技术实验	(220)
4.4.1	实验 1:数字电路常用仪器的使用	(220)
4.4.2	实验 2:TTL、CMOS 门电路静态参数测试	(221)
4.4.3	实验 3:基本逻辑门	(225)
4.4.4	实验 4:OC 门和三态门的应用	(229)
4.4.5	实验 5:组合逻辑电路设计	(233)
4.4.6	实验 6:半加器和全加器	(235)
4.4.7	实验 7:编译码显示系统	(237)
4.4.8	实验 8:数据选择器的应用	(241)
4.4.9	实验 9:触发器	(244)
4.4.10	实验 10:计数器	(247)
4.4.11	实验 11:集成计数器	(249)
4.4.12	实验 12:移位寄存器及其应用	(251)
4.4.13	实验 13:555 定时器	(253)
4.4.14	实验 14:D/A 数模转换器	(256)
4.4.15	实验 15:A/D 模数转换器	(258)
4.4.16	实验 16:综合性实验——电子秒表	(260)
4.4.17	实验 17:设计性实验—— $3\frac{1}{2}$ 位直流数字电压表	(263)
附录	电工电子实验装置	(265)
附录 1	GDDS 智能网络型电工实验装置	(265)
附录 2	THM-1 型模拟电路实验箱	(267)
附录 3	THD-1 型数字电路实验箱	(268)
附录 4	其他常用仪器使用说明	(269)
附录 5	常用集成电路管脚图	(273)
参考文献		(276)

1.1 测量误差基本概念和分类

1.1.1 误差的基本概念

在电工电子测量中,无论所用仪器多么精密,方法多么完善,实验者多么细心,所测结果总不能完全与被测量的真实数值(称为真值)一致。测量结果与被测量的真值不可避免的误差称为测量误差。为了解误差,首先应了解一些量的概念。

(1) 量值

量值为数值与计量单位的乘积,表示量的大小。例如,6 mV、8 A 等。

(2) 被测量

被测量为被测的量,它可以是待测量的量,也可以是已测量的量。

(3) 干扰量

干扰量是指不是被测量但却影响被测量的量值或计量器具示值的量,例如环境温度、被测信号的频率、电磁干扰等。

(4) 量的真值

量的真值可理解为没有误差的量值,它是一个理想的情况,实际上是不可确切知道的,只能随着科学技术的发展和测量水平的提高,使其测量值逼近真值。由国家(国际)保存的基准,按定义规定,在特定条件下的值可视为真值。鉴于量的真值是一个理想的概念,已不再使用它,而使用“量的值”或“被测量的值”。

(5) 约定真值

约定真值为约定目的而取的可以代替真值的量值。一般说来,约定真值与真值的差值可以忽略不计,故在实际测量中,约定真值可以代替真值。

(6) 准值

准值为一个明确规定的值,以它为基准定义准值误差。例如,该值可以是被测值、测量范围上限、仪器刻度盘范围、某一预调值及其他明确规定的值。

(7) 示值

对于测量仪器,示值是指示值或记录值;对于标准器具,示值是标称值或名义值;对于供给量仪器,示值是设置值或标称值。

(8) 额定值

额定值是制造者为设备或仪器在规定工作条件下指定的量值。

(9) 读数

读数为在仪器刻度盘或显示器上直接读到的数字。例如,以 100 分度表示 50 mA 的电流表,当指针指在 25 处时,读数是 25,而示值为 12.5 mA。有时为了避免差错和便于查对,在记录测量的示值时应同时记下读数。

(10) 实际值

实际值为满足规定精度而用来代替真值的量值。实际值可以理解为由实验获得的在某种程度上接近真值的量值。在计量检定中,通常将上一级计量标准所复现的量值称为下级计量器具的实际值。

另外,还有测量值。测量值为测量得出的量值,它可能是从计量器具直接得出的量值,也可能是通过必要的换算(如系数换算、借助于相应的图表或曲线等)所得出的量值。

1.1.2 测量误差的表示法和分类

1) 误差的表示法

(1) 绝对误差

绝对误差是测量值(示值)与被测量真值之间的差值。用 A_0 表示真值, x 表示测量值(示值),则绝对误差 Δx 可表示为:

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1.1.1)$$

当 $x > A_0$ 时, Δx 是正值;当 $x < A_0$ 时, Δx 是负值。所以 Δx 是具有大小、正负符号和单位的数值,它的大小和正负符号分别表示测量值偏离真值的程度和方向。

由于真值 A_0 一般是未知的,所以在实际测量中,常用被测量的实际值 A 来代替真值 A_0 。被测量的实际值通常使用上一级(或数级)的标准仪器或计量器具所测得的数值代替真值。

必须说明, A 不等于 A_0 ,一般说来, A 总比 x 更接近于 A_0 。常用的绝对误差表达式为:

$$\Delta x = x - A \quad (1.1.2)$$

【例 1.1.1】 被测电流的真值 I_0 为 50 A,用电流表进行测量,其测量值 I 为 50.5 A,则绝对误差为:

$$\Delta I = I - I_0 = 50.5 \text{ A} - 50 \text{ A} = +0.5 \text{ A}$$

若用上一级标准仪器测得的值为 50.05 A,则绝对误差为:

$$\Delta I = 50.5 \text{ A} - 50.05 \text{ A} = +0.45 \text{ A}$$

修正值是指绝对值与 Δx 相等、符号相反的值,常用 C 表示,即

$$C = -\Delta x = A - x \quad (1.1.3)$$

通过检定,由上一级标准(或基准)以表格、曲线或公式的形式给出受检仪器的修正值。利用修正值可求出被测量的实际值,即

$$A = x + C \quad (1.1.4)$$

在某些自动测试系统中,为了提高测量精度,减小测量误差,通常将修正值预先编制成有关程序存入仪器中,根据测量结果,自动对误差进行修正。

一般规定,绝对误差和修正值的单位必须与测量值一致。

【例 1.1.2】 测量两个电流,其实际值分别为 $I_1 = 50 \text{ A}$ 和 $I_2 = 10 \text{ A}$,测量值分别为 50.5 A 和 10.5 A,则绝对误差为:

$$\Delta I_1 = 50.5 \text{ A} - 50 \text{ A} = 0.5 \text{ A}$$

$$\Delta I_2 = 10.5 \text{ A} - 10 \text{ A} = 0.5 \text{ A}$$

两者的绝对误差相同,但其影响是不同的,前者比后者测量得准确。

(2) 相对误差

如上所述,绝对误差虽然可以说明测量值偏离实际值的程度,但不能反映测量结果的准确程度,应采用相对误差来表示。相对误差为绝对误差与被测量真值的比值,通常用百分数表示,则相对误差 γ_0 可以表示为:

$$\gamma_0 = \frac{\Delta x}{A_0} \times 100\% \quad (1.1.5)$$

在一般情况下,真值是得不到的,可用绝对误差与实际值之比表示相对误差,亦称为实际相对误差,用 γ_A 表示为:

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% = \frac{x - A}{A} \times 100\% \quad (1.1.6)$$

对于例 1.1.2,有:

$$\begin{aligned} \gamma_{A1} &= \frac{\Delta I_1}{I_1} \times 100\% = \frac{0.5 \text{ A}}{50 \text{ A}} \times 100\% = 1\% \\ \gamma_{A2} &= \frac{\Delta I_2}{I_2} \times 100\% = \frac{0.5 \text{ A}}{10 \text{ A}} \times 100\% = 5\% \end{aligned}$$

由上可见,相对误差可以表征测量的准确度。相对误差只有大小和符号,而无单位。在误差较小或要求不太严格的情况下,也可用仪器的测量值代替实际值。这时的相对误差称为示值相对误差,用 γ_x 表示为:

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{A_0} \times 100\% \quad (1.1.7)$$

式中: Δx ——由所用仪器的准确度等级确定。

由于 x 中含有误差,所以 γ_x 值适用于近似测量。对于一般的工程测量,用 γ_x 来表示测量的准确度比较方便。

(3) 引用误差

引用误差亦称满度相对误差。引用误差是为了评价测量仪器准确度等级而引入的,因为绝对误差和相对误差均不能客观、正确地反映测量仪器准确度的高低。引用误差定义为绝对误差与测量仪器的量程 x_m 值之比,用 γ_m 表示为:

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1.1.8)$$

测量仪器的各指示(刻度)值的绝对误差有正、有负,有大、有小。所以,测量仪器的准确度等级应用最大引用误差,即绝对误差的最大绝对值 $|\Delta x|_m$ 与量程之比,则最大引用误差 γ_{mn} 可以表示为:

$$\gamma_{mn} = \frac{|\Delta x|_m}{x_m} \times 100\% \quad (1.1.9)$$

国家标准 GB 776-76《测量指示仪表通用技术条件》规定,电测仪表的准确度等级指数 α 分为:7个等级,即 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0。它们的基本误差(最大引用误差)不能超过仪表准确度等级指数 α 的百分数,即

$$\gamma_{\text{mn}} \leq \alpha \% \quad (1.1.10)$$

例如,0.5级的仪表,就表明其 $\gamma_{\text{mn}} \leq 0.5\%$,其面板上标以0.5的符号。

【例 1.1.3】 检定一台量程为100 V的1.0级电压表,在电压为40 V处,其绝对误差为0.9 V,问该电压表是否合格?

解:根据题意有: $\gamma_{\text{mn}} = 100 \text{ V}, \alpha = 1.0, U = 40 \text{ V}, \Delta U = 0.9 \text{ V}$,因此,

$$\gamma_n = \frac{\Delta U}{U_m} \times 100\% = \frac{0.9 \text{ V}}{100 \text{ V}} \times 100\% = 0.9\% < 1.0\%$$

即 $\gamma_n < \alpha\%$,说明该电压表合格。

为提高测量精度,在选择仪表时,应尽量使被测量 x 靠近满度值 x_m ,至少 $x \approx \frac{2}{3}x_m$ 。

(4) 容许误差

容许误差为测量仪器在使用条件下可能产生的最大误差范围,它是衡量仪器的重要指标,测量仪器的准确度、稳定度等指标都可用容许误差来表征。容许误差通常用绝对误差表示,有如下3种表示形式:

$$\Delta x = \pm (a\% \cdot x + b\% \cdot x_m) \quad (1.1.11)$$

$$\Delta x = \pm (a\% \cdot x + n) \quad (1.1.12)$$

$$\Delta x = \pm (a\% \cdot x + b\% \cdot x_m + n) \quad (1.1.13)$$

式中: Δx ——容许误差;

a ——误差相对项系数;

x ——被测量的指示值;

b ——误差固定项系数;

x_m ——测量仪器的满度值;

$a\% \cdot x$ ——读数误差,与读数成正比;

$b\% \cdot x_m$ ——满度误差,不随读数变化,在 x_m 一定时,它是一个固定值;

n ——数字测量仪器显示的最后一位。

【例 1.1.4】 用一台4位的数字电压表的5 V量程分别测量5 V和0.1 V电压,已知该仪器的基本误差为 $\pm 0.01\%U_x \pm 1$ 个字,求由于该仪器的基本误差引起的测量误差。

解:4位数字5 V ± 1 个字相当于 $\pm 0.001 \text{ V}$ 。

测量5 V电压时,绝对误差为:

$$\Delta U_1 = \pm 0.01\% \times 5 \text{ V} \pm 0.001 \text{ V} = \pm 0.0015 \text{ V}$$

相对误差为:

$$\gamma_1 = \frac{\Delta U_1}{U_1} = \frac{\pm 0.0015 \text{ V}}{5 \text{ V}} \times 100\% = \pm 0.03\%$$

测量0.1 V电压时,绝对误差为:

$$\Delta U_2 = \pm 0.01\% \times 0.1 \text{ V} \pm 0.001 \text{ V} = \pm 0.001 \text{ V}$$

相对误差为:

$$\gamma_1 = \frac{\Delta U_2}{U_2} = \frac{\pm 0.001 \text{ V}}{0.1 \text{ V}} \times 100\% = \pm 1\%$$

由此可知,当测量小电压时,应选择较小量程的仪器,以提高测量精度。

2) 误差的分类

误差可以根据不同方法进行分类。

(1) 按误差来源分类

① 仪器误差:为仪器本身及其附件的电气、机械等特性不理想造成的误差。例如,电桥中的标准电阻、天平的砝码、示波器的探极线等都含有误差。仪器仪表的零位偏移、刻度不准确以及非线性等引起的误差均属此类。

② 环境误差:为各种环境因素与要求的条件不一致时所造成的误差,亦称影响误差。例如测量时由于温度、湿度、电源电压、电磁场、大气压强、振动、重力加速度等因素影响所引起的误差。

③ 理论误差:为由于测量时所依据的理论不严密或使用了不适当的简化,用近似公式或近似值计算测量结果所引起的误差。例如用普通万用表测量高内阻回路的电压,由于万用表内阻引起的误差。

④ 方法误差:为由测量方法不合理所造成的误差。

⑤ 人为误差:为受测量者的分辨能力、视觉疲劳、反应速度等生理因素的影响,以及一时疏忽等心理因素的影响而引起的误差。例如读错刻度、念错数据、使用或操作不当所造成的误差。

(2) 按误差性质分类

① 系统误差:为在相同的条件下多次测量同一个量值时,误差的绝对值和符号保持不变或在条件改变时,按一定规律变化的误差。产生这种误差的原因有:

a. 测量仪器设计原理及制作上的缺陷。例如刻度的偏差、刻度盘或指针安装偏心、使用时零点偏移、安放位置不当等。

b. 测量时的实际温度、湿度及电源电压等环境条件与仪器要求的条件不一致。

c. 采用近似的测量方法或近似的计算公式。

d. 测量人员估计读数时,习惯偏于某一方向等。

系统误差的特点是:测量条件一经确定,误差就为一确定的数值。用多次测量取平均值的方法,并不能改变误差的大小。系统误差的产生原因是多方面的,但总是有规律的。因此,应掌握其规律性,采用一定的技术措施(如引入修正值法)以减小它的影响。

② 随机误差:为在相同的条件下多次测量同一个测量值时,误差的绝对值和符号均以不可预定的方式变化的误差,亦称偶然误差。产生这种误差的原因有:

a. 仪器中零部件配合不稳定或有摩擦,以及内部器件产生噪声。

b. 温度及电源电压的频繁波动、电磁场干扰、地基振动等。

c. 测量人员感觉器官的无规则变化、读数不稳定。

随机误差的特点是:在多次测量中,误差的绝对值的波动有一定的界限,即具有有界性;正负误差出现的机会相同,即具有对称性。系统误差的特点如图 1.1.1 所示。图中, A_0 为假设无系统误差时的实际值, n 为测量次数。当测量次数足够时,随机误差的算数平均值趋近于 0,即具有抵偿性。

根据随机误差的特点,可以通过对多次测量的值取算术平均值的方法来降低随机误差对测量结果的影响。因此,对于随机误差,可以用数理统计的方法来处理。

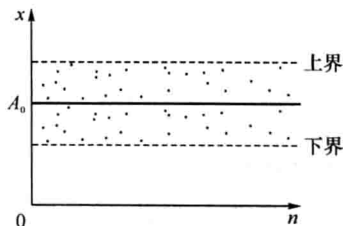


图 1.1.1 随机误差的有界性和对称性

③ 疏忽误差:为在一定的测量条件下测量值明显地偏离实际值所形成的误差,亦称粗大误差。产生这种误差的原因有:

a. 一般情况下,它不是仪器本身固有的,主要是测量过程中由于疏忽而造成的。例如测量者身体过于疲劳、缺乏经验、操作不当或工作责任心不强等原因造成读错刻度、记错读数或计算错误。这是产生疏忽误差的主观原因。

b. 由于测量条件的突然变化,如电源电压、机械冲击等引起仪器示值的改变。这是产生疏忽误差的客观原因。

在测量及数据处理过程中,当发现某次测量结果所对应的误差特别大时,应认真判断该误差是否属于疏忽误差,如属于疏忽误差,该测量结果(常称为坏值)应舍去不用。上述3种误差同时存在的情况,可用图1.1.2表示。图中, A_0 表示真值,小黑点表示各次测量值 x_i , E_x 为 x_i 的平均值; δ_i 为随机误差; ϵ 为系统误差; x_k 为坏值,它远离真值 A_0 。

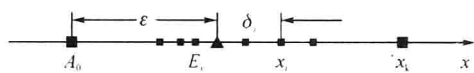


图 1.1.2 3种误差同时存在的情况

由图可知:

a. 由于 x_k 的存在,将严重影响平均值 E_x ,使其失去意义。因此,在整理测量数据时,必须首先将其舍去。

b. 随机误差 $\delta_i = x_i - E_x$ 当舍去 x_k 以后,可以采取对多次测量数据取算术平均值的方法,以消除随机误差 δ_i 的影响。

c. 在 δ_i 消除后,系统误差 $\epsilon = E_x - A_0$ 越小,表示测量越准确。当 $\epsilon = 0$ 时,平均值就可等于真值 A_0 。

上述的划分方法只是相对的,可以相互转化。较大的系统误差或随机误差,也可以视为疏忽误差。系统误差与随机误差之间不存在严格的界限。例如:当电磁干扰所引起的测量误差比较小时,可以用类似随机误差取平均值的方法来处理;当其影响有利于掌握规律时,可以按系统误差引入修正值的方法来处理;当其影响有利于掌握规律时,可以按系统误差引入修正值的方法来处理。这样,掌握了误差转化的特点,就可以用数据处理的方法,减小误差的影响,这对于测量技术是很有意义的。

(3) 按被测量随时间变化分类

① 静态误差:为在测量过程中被测量随时间变化缓慢或基本不变时的测量误差。

② 动态误差:为被测量随时间变化很快的过程中测量所产生的附加误差。动态误差是由于测量系统或仪器的各种惯性对输入信号变化响应的滞后,或者输入信号中的不同频率分量通过测量系统或仪器时,受到不同程度的衰减或延时所造成的误差。

(4) 按使用条件分类

① 基本误差:为测量系统在规定的标准条件下使用时所产生的误差。所谓标准条件,一般指测量系统在实验室、制造厂或计量部门标定刻度时所保持的工作条件,如电源电压 $220\text{ V} \pm 11\text{ V}$ 、温度 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 、湿度小于80%、电源频率50 Hz等。测量系统的精确度就是由基本误差决定的。

② 附加误差:当使用条件偏离规定的标准条件时,除基本误差外,还会产生附加误差,例如由于温度超过标准温度引起的温度附加误差、电源波动引起的电源附加误差以及频率变化引起的频率附加误差等。这些附加误差在使用时应叠加到基本误差上。

(5) 按误差与被测量的关系分类

① 定值误差:为不随被测量变化的误差。这类误差可以是系统误差,例如直流测量回路中

存在热电动势等;也可以是随机误差,例如检测系统中执行电机的启动引起的电压误差等。

② 累积误差:为在整个检测系统量程内的误差值 Δx 与被测量 x 成比例地变化,即

$$\Delta x = \gamma_s x \quad (1.1.14)$$

式中: γ_s ——比例系数。

1.2 测量误差的估计和常用消除方法

1.2.1 随机误差的估计和消除方法

对于单次测量随机误差是没有规律的,需进行多次测量,用统计学方法研究其规律并处理测量数据,以减小其对测量结果的影响,并估计出其最终残留影响的大小。对随机误差的估计是在无系统误差的假设条件下进行的。

1) 算术平均值原理

设对某一被测量 x 进行测量次数为 n 的等精度测量,得到的测量值 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为随机变量。其算术平均值为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.2.1)$$

当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,算术平均值的极限称为测量值的数学期望,亦称总体平均值,用 E_x 表示,即

$$E_x = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (1.2.2)$$

由于随机误差 $\delta_i = x_i - E_x$,若一组测量数据中不含有系统误差和疏忽误差,则有:

$$\Delta x_i = \delta_i = x_i - E_x \quad (1.2.3)$$

由随机误差的抵偿性可知,当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, $E_x = A_0$, 则有:

$$\delta_i = x_i - A_0 \quad (1.2.4)$$

随机误差的算术平均值将趋于 0,即

$$\bar{\delta} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \right) = 0 \quad (1.2.5)$$

这说明随机误差的数学期望等于 0。

对于有限次测量,当 n 足够大时,可近似地认为:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \approx 0 \quad (1.2.6)$$

亦有:

$$E_x = A_0 \quad (1.2.7)$$

由上述分析可知,当无系统误差 ($\epsilon = 0$) 和无疏忽误差 ($x_k = 0$) 时,测量值的数学期望可视为被测量的相对真值,即在仅有随机误差的情况下,当 n 足够大时,测量值的平均值接近于真

值。因此,通常把这时经多次等精度测量的算术平均值称为真值的最佳估计值,即

$$\hat{A}_0 = \bar{x} = E_x \quad (1.2.8)$$

2) 残差、方差和标准差

(1) 残差

残差为各次测量值与其算术平均值之差,亦称剩余误差,用 v_i 表示,即

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1.2.9)$$

对残差求和:

$$\sum_{i=1}^n v_i = \sum_{i=1}^n x_i - n\bar{x}$$

因为 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x}$, $\sum_{i=1}^n x_i = n\bar{x}$, 所以: $\sum_{i=1}^n v_i = \sum_{i=1}^n x_i - n\bar{x} = 0$ 。

这说明当 n 足够大时,残差的代数和为 0。利用这个性质可以检验所计算的算术平均值是否正确。

(2) 方差和标准差

为反映测量数据的离散程度,引入了方差。方差为当 $n \rightarrow \infty$ 时测量值与期望值之差的平方的统计平均值,用 σ^2 表示,即

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - E_x)^2 \quad (1.2.10)$$

因为 $\delta_i = x_i - E_x$, 则有:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2 \quad (1.2.11)$$

对式(1.2.11)开平方,取正平方根,得:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2} \quad (1.2.12)$$

σ 称为测量值数列的标准差或样本标准差,简称标准差。 σ 是随机变量的一个重要统计量。

也可用残差来确定标准差,即采用贝塞尔公式:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (1.2.13)$$

δ_i 取平方的目的是不论 δ_i 是正还是负,其平方的结果总是正值,相加之和不会等于 0,从而可以描述随机误差的分散程度,这样在计算过程中就不必考虑 δ_i 的符号,从而带来方便。求和再平均后,使个别较大的误差在式中占的比例也较大,即标准差对较大的误差反应灵敏,所以它是表征精度的参数。 σ 小表示测量值集中, σ 大则表示测量值分散。

3) 随机误差正态分布

在大多数情况下,随机误差符合正态分布,其分布密度为:

$$\varphi(x_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \frac{(x_i - E_x)^2}{2\sigma^2} \quad (1.2.14)$$

$\varphi(x_i)$ 与 x_i 的函数曲线如图 1.2.1 所示。由图可见, 测量值对称地分布在数学期望值的两侧。

利用式(1.2.8)、式(1.2.9), 由式(1.2.14)可得 v_i 的分布密度 $\varphi(v_i)$ 为:

$$\varphi(v_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \frac{v_i^2}{2\sigma^2} \quad (1.2.15)$$

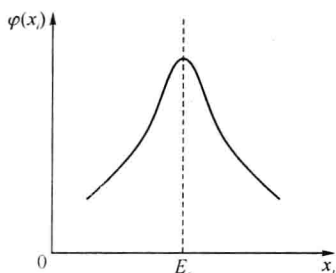


图 1.2.1 x_i 的正态分布

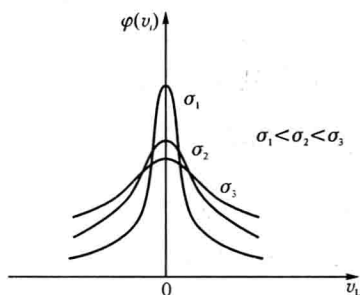


图 1.2.2 v_i 的正态分布

$\varphi(v_i)$ 与 v_i 的函数曲线如图 1.2.2 所示。由图可见, σ 越小, 曲线形状越陡, 随机误差的分布越集中, 表明测量精度越高; 反之, σ 越大, 曲线形状越平坦, 随机误差分布越分散, 测量精度越低。

4) 算术平均值的标准差

在有限次等精度测量中, 以算术平均值作为测量结果。如果在相同条件下对同一量值做 m 组划分, 每组重复 n 次测量, 每一组数据都有一个平均值。由于随机误差的存在, 这些算术平均值并不相同, 围绕真值具有一定的分散性, 这说明算术平均值还存在误差。对此, 在要求精密度更高时, 可用算术平均值的标准差 $\sigma_{\bar{x}}$ 评价。

由概率统计学可知:

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \sigma^2 \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right] = \frac{1}{n^2} \sigma^2 \left[\sum_{i=1}^n x_i \right]$$

因为是等精度测量, 有 $\sigma_1 = \sigma_2 = \cdots = \sigma_n$, 于是:

$$\sigma^2 \left[\sum_{i=1}^n x_i \right] = n\sigma^2$$

则

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{n^2} n\sigma^2 \quad (1.2.16)$$

由式(1.2.16)可得 $\sigma_{\bar{x}}$ 的计算式为:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.2.17)$$

当 n 为有限次测量时, 用估算值 $\hat{\sigma}$ 代替 σ , 则

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} \quad (1.2.18)$$

由式(1.2.17)、式(1.2.18)可知,算术平均值的标准差是任意一组测量样本标准差的 $1/\sqrt{n}$ 。以上结论是在每组测量数据的标准差 σ 都相等的前提下得出的,它表明每组测量次数相同,做两组测量与做更多组测量的 $\sigma_{\bar{x}}$ 值相同,则可把多组测量等效为一组来计算 $\sigma_{\bar{x}}$ 。但实际测量中,各组的 $\bar{x}$ 值并不相同,将各组的 x 值再平均一次后的数值更接近于真值。因此,采用多组测量比单组测量的准确度高。

增加每组测量的测量次数,也可提高测量精度。但要显著增加测量精度,需做大量的测量工作。在 σ 一定时,当 $n > 10$ 以后, $\sigma_{\bar{x}}$ 的减小已非常缓慢。另外,随着测量次数的增加,测量条件恒定的要求难以得到保证,从而带来新的误差,所以一般情况下 $n \leq 10$ 较为适宜。

1.2.2 系统误差的估计和消除方法

1) 系统误差的特征

在实际测量过程中往往存在系统误差,在某些情况下的系统误差数值比较大。一次测量结果的精度不仅取决于随机误差,还取决于系统误差。

当测量次数 n 足够大时,考虑到在系统误差不变的情况下,绝对误差 $\Delta x_i = \epsilon + \delta_i$ 的算术平均值为:

$$\Delta \bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = \epsilon + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i$$

由于随机误差的抵偿性,当 n 足够大时, δ_i 的算术平均值趋于0,则

$$\epsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = \bar{x} - A_0 \quad (1.2.19)$$

由此可见,当 ϵ 与 δ_i 同时存在、并且 n 足够大时,各次测量绝对误差的算术平均值就等于系统误差 ϵ ,说明测量结果的精确度不仅取决于随机误差,还取决于系统误差。由于系统误差不具备抵偿性,采用平均值方法对它无效。系统误差的特征如图1.2.3所示。系统误差包括以下几种:

(1) 恒值系统误差

恒值系统误差如图1.2.3中直线 a 所示。在整个测量过程中,误差的大小和符号固定不变。例如,由于仪器的固有(基本)误差引起的测量误差均属此类。

(2) 线性系统误差

线性系统误差如图1.2.3中直线 b 所示。在整个测量过程中,误差值逐渐增大(或减小)。例如,电路用电池供电,由于电池的端电压逐渐下降,将导致线性系统误差。

(3) 周期性系统误差

周期性系统误差如图1.2.3中曲线 c 所示。在整个测量过程中,误差值周期性变化。例如,晶体管 β 值随环境温度的周期性变化而变化,将产生周期性系统误差。

(4) 复杂变化的系统误差

复杂变化的系统误差如图1.2.3中曲线 d 所示。在整个测量过程中,误差的变化规律变化很复杂。图1.2.3中的 b 、 c 、 d 为变值系统误差。

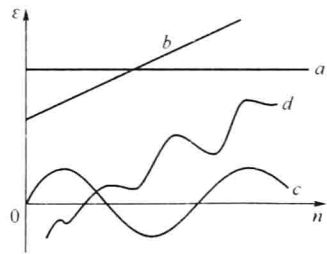


图 1.2.3 系统误差的特征